

Új módszer a kompoziterősítő kerámiaszálak áthúzhatóságának meghatározására

A New Method for Determining the Pullability of Composite Reinforcing Ceramic Fibres

Dobránszky János,¹ Bitay Enikő²

¹ MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Budapest, Magyarország; Dobranszky.Janos@eik.bme.hu

² Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Marosvásárhely, Románia, ebitay@ms.sapientia.ro

Összefoglalás

Az alumíniummátrixú kompozithuzalok előállításának egyedi módszere a Blücher-eljárás, vagyis a folyamatos, gáznyomásos infiltráció. Az eljárás alapvető fontosságú feltétele az, hogy az erősítőszálak kötegeit minél kisebb károsodással lehessen áthúzni a gáznyomásos rendszer kapuin. A cikk egy új vizsgálati eljárást ismertet, amely arra alkalmas, hogy a kerámiaszálaknak ezt a funkcionális tulajdonságát – az áthúzhatóságot – összehasonlításra alkalmas módon, számszerűen is jellemezze.

Kulcsszavak: fémmátrixú kompozit, erősítőszál, folyamatos nyomásos infiltráció.

Abstract

A unique method for producing aluminum matrix composite wires is the Blücher process, i.e. continuous gas-pressure infiltration. An essential condition of the process is that the fibre roving of the reinforcing fibres can be pulled across the orifices of the gas-pressure system with the least damage. The article describes a new test procedure that is capable of characterizing this essential functional property of the ceramic reinforcing fibres in a manner comparable and quantitative.

Keywords: metal matrix composite, reinforcing fibre, continuous gas-pressure infiltration

1. Bevezetés

A villamos távvezetéki sodronyokban az acél-mag helyett kompozitmagot alkalmaznak a 2000-es évek elejétől. Ezek előnye a kisebb hőátadási együttható és a nagyobb fajlagos szilárdság. A kompozitmagos villamos távvezetékek a nagy hőmérsékletre melegedve is kis belógású vezetékek körében nyertek teret. A kompozitmagos távvezetékek vezető típusa az ún. ACCC-kábel. A kis belógású kábelek másik fontos típusában (jele: ACCR) az acél maghuzalokat alumíniummátrixú, kerámiaszállal erősített kompozithuzalok helyettesítik. Ennek a megengedhető maximális hőmérséklete felülmúlja az ACCC-kábelekét. Az alumíniummátrixú kompozithuzalok gyártására valójában csak két megoldás bizonyult sikeres-

nek: a folyamatos, nyomásos infiltráció, azaz a Blücher-eljárás [1] és az ipari méretekben is alkalmazott, ultrahanggal segített infiltráció [2]. A Blücher-eljárás kulcsfontosságú műveleteként az erősítőszálakat át kell húzni az olvadékokat tartalmazó, gáznyomásos rendszeren [3].

Az erősítőszálak áthúzhatósága mint funkcionális tulajdonság eddig nem volt ismert. Ennek az oka, hogy folyamatos, gáznyomásos infiltrációval csak a Blücher-eljárás képes kompozithuzalok előállítására, és az ezt az eljárást alkalmazó kutatások tudomásul vették, hogy az erősítőszálak egyes fajtái nem alkalmazhatók. Csaknem 15 éven át nem sikerült megismételni a szénszál erősítésű kompozithuzalok gyártásának sikeres kísérletsorozatát [4], és a tisztán alumínium-oxid

kerámiaszálakra (Nextel 610) is úgy tekintettünk, hogy nem alkalmasak a folyamatos nyomásos infiltrálásra.

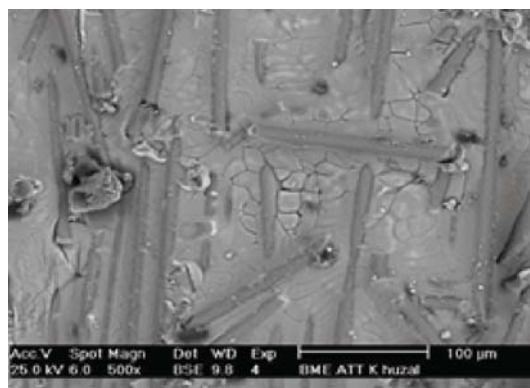
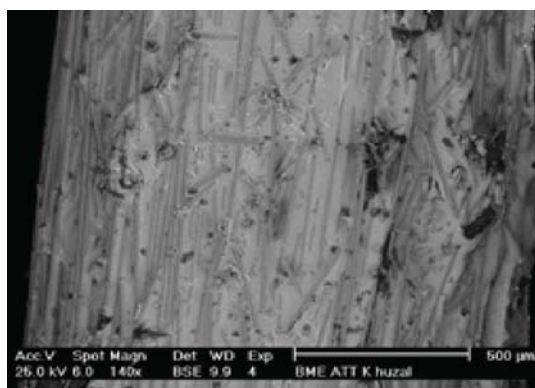
Az áthúzhatóság, mint a szálakkal szembeni követelmény, akkor kapott fontosságot, amikor belekezdünk a Dialed szénszál és a CeraFib 99 kerámiaszál kompozithuzal-erősítőanyagként való alkalmazhatóságának kutatásába. A cikkben az erősítőszálak áthúzhatóságának meghatározására kidolgozott módszert ismertetjük.

2. A kompozithuzal erősítőszálai

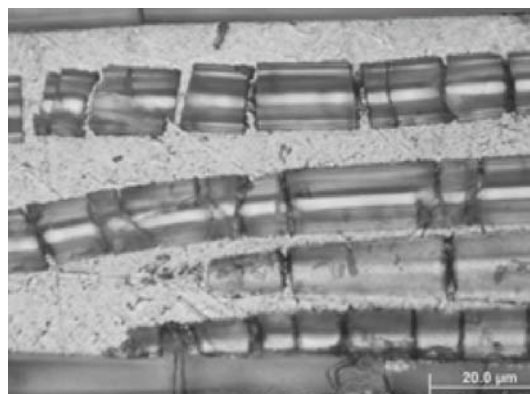
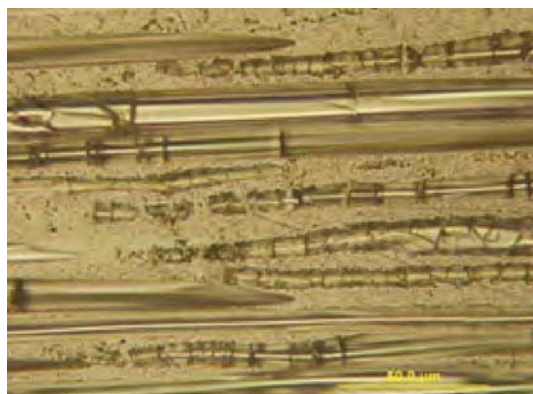
Azokat – és csak azokat – az anyagokat nevezzük fémmátrixú kompozitoknak, amelyekben az erősítőanyag és a fémes mátrix a teljes gyártási folyamat során elkülönül [5, 6]. Egybevág ezzel Ashby meghatározása: a kompozitok – vagyis az össze- (egymáshoz) tett anyagok – két, önmagában is szilárd anyag társításával jönnek létre, és ha az összetartó anyag fémes, akkor fémmátrixú kompozitról beszélünk [7].

Az alumíniummátrixú kompozithuzalok folyamatos infiltrációval történő gyártása során a szálköteget teljes keresztmetszetben át kell itatni (infiltrálni) a megolvasztott fémme [8]. A spontán infiltráció feltételeinek kialakítására irányuló kutatások [9] a gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából sikertelenek voltak, és bár több ezer méter kompozithuzal készült a laboratóriumi berendezésen, az ipari alkalmazásig a Blücher-eljárás sem jutott el; ez csak a jóval lassabb, ultrahangos eljárásnak [2] sikerült.

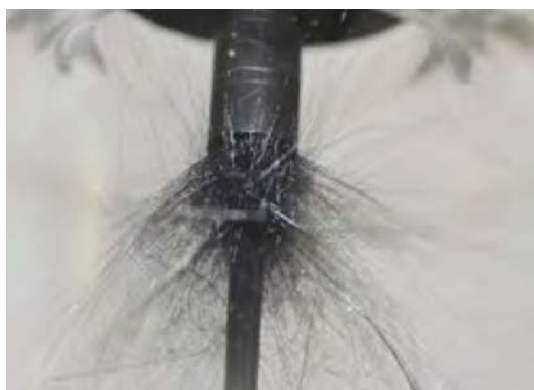
Az alumíniummátrixú kompozithuzalok gyártása a Blücher-eljárással egy különleges, három elemből álló kapurendszeren való áthúzással valósul meg. A kapuk átmérője gondosan illeszkedik a szénszálköteg és a gyártandó kompozithuzal átmérőjéhez. Az erősítőszálak kötege a bemeneti kapun érkezik a nyomás alatt lévő és az olvadékat is tartalmazó kamrába, és itt kezdődik el az átítatódásuk az olvadt fémme.



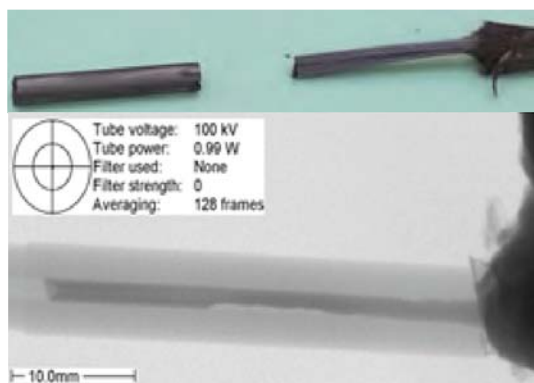
1. ábra. Alumíniummátrixú kompozithuzal felületének teljes szélessége (fent) és egy részlete (lent); jól látható, miként töredezték össze a felületre került szálak



2. ábra. A kompozithuzal belsejében végbement szálszakadás a huzal hosszmetzeti csiszolatán optikai mikroszkópi képen



3. ábra. A szénszálköteg bolyhozódása a grafitból készült bemeneti kapu bejáratánál



4. ábra. A kapuba beszakadt szénszálköteg optikai és röntgenmikroszkópi képe



5. ábra. A bemeneti kapuba befűzött, áthúzásra előkészített CeraFib 99 szálköteg

Az áthúzás közben a szálköteg összepréselődik a bemeneti kapu bejáratánál, a kapu falával érintkező elemi szálak erősen súrlódnak a falhoz, és a köteg belsejében lévő szálak között is kialakulhatnak különféle mechanikai hatások, amelyek a szálak töredezését vonják maguk után (**1. ábra**).

A tapasztalat szerint még a jól kezelhető oxidkerámia szálkötegek elemi szálai is töredeznek belül (**2. ábra**). A szálköteg bolyhozódik, eltömíti a kapu bejáratát (**3. ábra**), s végül kitépi a kaput a helyéről vagy elszakad. A **3. ábrán** Dialed K63712 szénszálköteg áthúzásakor, a bevonat leégetése után, az 1,6 mm átmérőjű grafitkapuhoz érve kialakult bolyhozódás látható. A besodródó száldarabok fennakadnak a középső kapun, amelynek bemeneti nyílása belemerül az olvadékba, és fokozatosan eltömítve a bejáratot (**4. ábra**), a szálköteg szakadására vezet.

A szénszálakra főleg a bolyhozódás jellemző, az oxidkerámia szálak áthúzásakor (**5. ábra**) az elemi szálaknak a kötegről való csoportos leválása és a bemeneti kapuba való beszakadása jellemző (**6. ábra**).

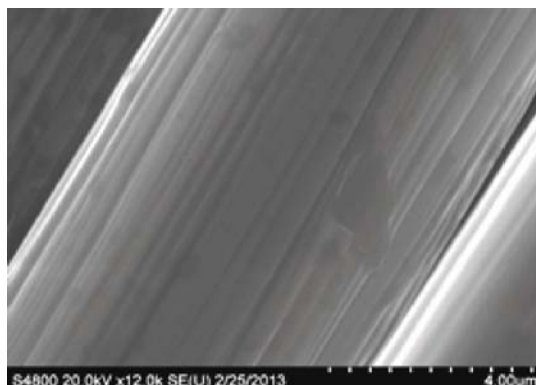
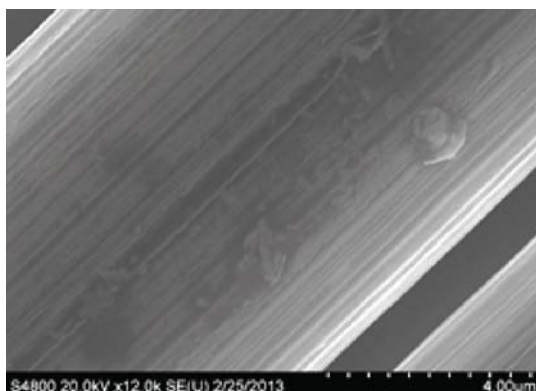


6. ábra. A már a bemeneti kapu előtt szakadozó, majd elszakadt CeraFib 99 szálköteg

3. A kísérletek és a vizsgálatok

Az eddigiekből világosan kitűnik, hogy a kompozithuzalok folyamatos, gáznyomásos infiltrálással történő előállításának sarkalatos pontját képezik a szálköteg áthúzásának feltételei, amelyeket együttesen nevezhetünk áthúzhatóságnak. Mivel a nem megfelelő áthúzhatóság minden esetben a szálköteg szakadásával végződik, ezért talán kézenfekvőnek tűnne az áthúzhatóságot a kerámia-szálak valamilyen szilárdsági jellemzőjével jellemezni. Ám sem a gyártók által közölt szilárdság, sem a fajlagos modulus [10–11] erre nem megfelelők, ugyanis nem mondanak semmit a kerámia-szálak nyírás vagy hajlítás hatására bekövetkező törési viselkedéséről. Az elemi szálakra nézve a felületi érdesség (7. ábra) sem jó jellemző, mivel az áthúzás egyszerre több ezer elemi szálból álló kötegeket mozgat. Az Al99,5+Cerafib kompozithuzal gyártási folyamatában 5 db tekercsből egyesített, kb. 4000 elemi szálat tartalmazó köteg áthúzását végeztük (8. ábra).

A korábbi kutatásaink során azt tapasztaltuk, hogy az egykomponensű, tehát pl. csak Al_2O_3 -t



7. ábra. Elemi szál felülete; fent: Dialed K6372 szén-szál, lent: Zoltek-szén-szál

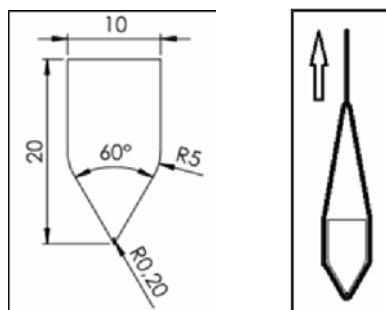


8. ábra. A szálköteg áthúzása a kompozithuzal gyártási folyamatában

tartalmazó oxidkerámia szálak vagy a szénszálak kötegei nagyon törekenyek. Az egykomponensű szálak áthúzóhatósága olyan rossz, hogy a Blücher-eljárás aktív alkalmazásának 20 éve során (2014 végéig) egyszer sem sikerült számottevő mennyiségű kompozit-huzalt előállítani tiszta oxidkerámia szálból (pl. Nextel 610), és szénszálból is csak egy kísérlet-sorozat volt igazán eredményes. Ezzel szemben a mullitot és amorf szilícium-dioxidot tartalmazó erősítőszálakból (pl. Nextel 440) a gyártás az ipari követelményeket is kielégítő stabilitással működött.

Sokáig mindezt a nedvesítési problémákkal magyarázta mindenki, ezért a kutatási erőfeszítések is a nedvesítés javítására irányultak. Amikor azonban a Dialed szénszállal erősített kompozit-huzalok előállításába belekezdünk, a bemeneti kapu fejlesztése során végzett „száraz” (fémoldék nélkül, szobahőmérsékleten végzett) áthúzási kísérletek eredményeiből felismertük, hogy a legnagyobb akadály nem a gyenge nedvesítés, hanem a szálköteg töredezése és bolyhozódása. Ennek a felismerésnek a nyomán a gáznymásos rendszer egészét teljesen átalakítottuk. Ebben a jelentős tervezési, gyártási, kísérleti és anyagvizsgálati munkában a több évtizedes tanári és kutatói munkánk legjobbjai közé tartozó diákjaink játszottak kulcsszerepet: Törzsök Péter és Tihanyi Károly. Az ő rendkívüli munkájuknak köszönhetően sikerült megoldani az alumíniummátrixú, szénszál erősítésű kompozit huzalok előállításának problémáját, és 15 évvel a Northeastern University Metal Matrix Composit Laboratory-jában (Boston, MA, USA) végzett sikeres kísérlet-sorozat után [4] azt megismételni Budapesten [12].

A megoldás fontos eleme volt a szálkötegek áthúzóhatósági sajátosságainak megismerése és a megfelelő áthúzóhatóságot biztosító fejlesztések végigvitele (ezeket az eredményeket még nem publikáltuk).



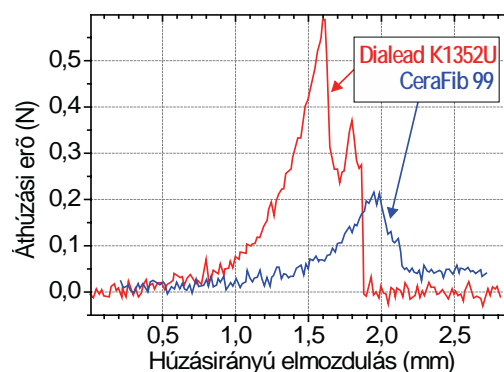
9. ábra. Az áthúzóhatóság vizsgálatára kifejlesztett szerszám és a TPTK-teszt vázlata

A szálkötegek áthúzóhatóságának jellemzésére kifejlesztettünk egy vizsgálati eljárást: az ún. TPTK-tesztet. Ennek lényege az, hogy a szálkötegből képzett hurkot a két ágának egyenletes húzásával ráfeszítjük egy polírozott felületű szerszámlélre; a szerszám jellemző méretei a 9. ábrán, a vizsgálati elrendezés pedig a 10. ábrán látható.

A 11. ábra – a TPTK-diagram – kétféle szálkötegre mutatja a húzóerő változását. A húzás közben



10. ábra. Az áthúzóhatóság vizsgálatára kifejlesztett szerszám befogása a szakítógépre különböző szálkötegek példáján



11. ábra. Kétféle erősítőszál TPTK-diagramja

az elemi szálak és a szálköteg maga is a rákényszerített hajlítási szögben és hajlítási sugáron eltörrik. A legnagyobb erőt keressük; ez az áthúzóhatóságot számszerűen is jellemző TPTK-tényező.

Az 1. táblázat hat különböző erősítőszálra vonatkozóan mutatja az áthúzóhatóságot jellemző maximális erőt.

1. táblázat. Hat erősítőszál vizsgálati adatai

Szálfajta	Elemi szál	F _{max} (N)
Tyranno TY-S1A04PX	400	5,11
Tyranno TY-S1A04PX	400	5,05
Tyranno TY-S1A04PX	400	4,06
Dialead K1352U	2000	0,59
Dialead K1352U	2000	0,50
Dialead K1352U	2000	0,59
Dialead K63712	12 000	1,93
Dialead K63712	12 000	1,31
Dialead K63712	12 000	1,85
CeraFib99	468	0,21
CeraFib99	468	0,21
CeraFib99	468	0,17
CeraFib99	468	0,22
Nextel 440	750	2,49
Nextel 440	750	3,51
Nextel 440	750	2,49
Nextel 610	400	0,91
Nextel 610	400	0,83
Nextel 610	400	0,97

4. Az eredmények mérlegelése

A TPTK-diagram természetesen sokféle rendezőelv mentén kiértékelhető, amelyekbe a szálkötegek különféle jellemzőit – pl. az elemi szálak számát és keresztmetszetét, a szálköteg felületi bevonatának állapotát stb. – is be lehet építeni, de tapasztalatunk szerint az áthúzóhatóság jellemzésére tökéletesen megfelel a TPTK-teszt során mért húzóerő legnagyobb értéke.

Ámde úgy véljük, hogy a TPTK-teszt alkalmazásával érdemi információkat lehetne nyerni nem csak egyre, hanem egyesített vagy megosztott szálkötegekre is, de akár az egyes elemi szálakra nézve is. Ez utóbbihoz olyan mérőrendszer szükséges, mint amilyen az elemi szálak hárompontos hajlítóvizsgálatát végzik [13] vagy a csúszással és könyöködéssel végbemenő elemi szálkárosodást vizsgálják [14, 15].

A kompozithuzalok gyártása során általában – a huzalátmérőtől és a tekercsek elemi szál számától

függően – 5–20 száltekeres pásmáit kell egyesítve bevezetni a bemeneti kapun keresztül a gáznyomásos rendszerbe.

A sokéves kutatómunka során azt tapasztaltuk, hogy a jól áthúzóható erősítőszálakra nézve (pl. Nextel 440) az egyesített pásmák száma növekedésének nincs érdemleges hatása az áthúzóhatóságra. Ugyanakkor a nagyon törékeny szálak esetén az áthúzóhatóságot jelentősen rontja a pásmák számának növekedése. A szénszáltekercsek felhasználásakor is romlik a szálköteg áthúzóhatósága, ha egynél több tekercs bevezetését és áthúzását igényli a kompozithuzal átmérője.

Éppen ezért értékeltük úgy a szálhurkok szakításán alapuló TPTK-tesztek eredményeit, hogy az áthúzóhatóság jellemzésére nagyon is megfelelő lesz a vizsgálat közben mért erő. Így nem okoz zavart a több tekercs egyesítésekor szükségszerűen eltérő megfeszítettség sem.

5. Következtetések

A fentiekben ismertetett kutatómunka eredményei és azok értékelése alapján az alábbi következtetéseket tartjuk lényegesnek kiemelni.

Az alumíniummátrixú kompozithuzalok Blücher-eljárással való előállításában alapvető funkcionális tulajdonságként kell tekinteni az erősítőszálak áthúzóhatóságát. Az áthúzóhatóság műszaki tartalma abban áll, hogy a szálköteg bolyhozódás és szakadásra vezető száltöredezés nélkül áthúzóható a gáznyomásos rendszer kapuin, különösen a bemeneti kapun.

Az áthúzóhatóság jellemzésére új vizsgálati eljárást ismertettünk, amely a szálköteg egy darabjából képzett zárt huroknak a kényszerített feltételek közötti, teljes szakadásig tartó, hajlító-húzó-nyíró terhelésén alapul. Az áthúzóhatóság számszerű jellemzésére bevezettük a TPTK-tényezőt, amely a vizsgálat során mérhető legnagyobb erővel azonos.

A különféle erősítőszálakkal végzett áthúzási kísérletek és a kompozithuzalok gyártási kísérleteinek tapasztalatai, valamint a TPTK-tesztek alapján megállapítható, hogy a kompozithuzalok előállítása a Blücher-eljárással csak abban az esetben lehet eredményes, ha a kiválasztott erősítőszál TPTK-tényezője nagyobb 1-nél. Ez alapján a tiszta oxidkerámia-szálakat és a kis elemiszálszámú szénszálkötegeket nem célszerű használni.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők közül Bitay Enikőt a kutatómunkájában az MTA Domus Hungarica ösztöndíjprogram támogatta.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Blucher J.T., Narusawa U., Katsumata M., Nemeth A.: *Continuous manufacturing of fiber-reinforced metal matrix composite wires – technology and product characteristics*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 32/12. (2001) 1759–1766.
[https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00024-0](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00024-0)
- [2] Matsunaga T., Ogata K., Hatayama T., Shinozaki K., Yoshida M.: *Effect of acoustic cavitation on ease of infiltration of molten aluminum alloys into carbon fiber bundles using ultrasonic infiltration method*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 38/3. (2007) 771–778.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.09.003>
- [3] Nadler J. H., Isaacs J. A., Kowalski G. J.: *Hydrodynamic modeling of a continuous metal matrix composite fabrication process as a cylindrical array*. Materials Science & Engineering: A, 297/1–2. (2001) 132–137.
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01266-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01266-1)
- [4] Doktor M.: *Production and characterization of continuous fiber reinforced aluminum wires*. PhD-értékezés, Technische Universität Wien, Institut für Werkstoffkunde und Materialprüfung (2000).
- [5] Miracle D. B.: *Metal matrix composites – From science to technological significance*. Composite Science and Technology, 65/15–16. (2005) 2526–2540.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.027>
- [6] Evans A, Marchi CS, Mortensen A: *Metal matrix composites in industry: an introduction and a survey*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003.
- [7] Ashby M., Sherdiff H., Cebon D.: *Materials, engineering, science, processing and design*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2007.
- [8] Michaud V., Mortensen A.: *Infiltration processing of fibre reinforced composites: governing phenomena*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 32/8. (2001) 981–996.
[https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00015-X](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00015-X)
- [9] Margueritat-Regenet C.: *Elaboration et caractérisation de fils composites C/Al. Infiltration spontanée et continue par activation chimique du mouillage*. Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des mines, Paris, 2002.
<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00005642/>
- [10] *High-Performance structural fibers for advanced polymer matrix composites*. National Research Council, The National Academies Press, Washington, D.C., 2005.
<https://doi.org/10.17226/11268>
- [11] Ashbee K. H. G.: *Fundamental principles of fiber reinforced composites*. Second Edition. Technomic Publishing Company, Lancaster, 1993.
- [12] Tihanyi K.: *Fémátrixú hibrid anyagok gyártása*. Diplomamunka. BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 2013.
- [13] Steinmann W., Saelhoff A. K.: *Essential properties of fibres for composite applications*. In: Fibrous and textile materials for composite applications. Textile Science and Clothing Technology (Szerk: Rana, S., Figueiro, R.), Springer, Singapore, 2016. 39–73.
https://doi.org/10.1007/978-981-10-0234-2_2
- [14] Clawson J. K.: *Structure and defects in high-performance aramid fibers*. Master Thesis, University of Illinois, Urbana, 2013.
<http://hdl.handle.net/2142/46888>
- [15] Leal A. A., Deitzel J. M., Gillespie J. W.: *Compressive strength analysis for high performance fibers with different modulus in tension and compression*. Journal of Composite Materials, 43/6. (2009) 661–674.
<https://doi.org/10.1177/002198308088589>